

# Routing: Algoritmos y arquitectura

Area de Ingeniería Telemática  
<http://www.tlm.unavarra.es>

Grado en Ingeniería en Tecnologías de  
Telecomunicación, 3º

# Temas de teoría

0. Introducción
1. QoS
2. Encaminamiento dinámico en redes IP
3. Tecnologías móviles

# Objetivos

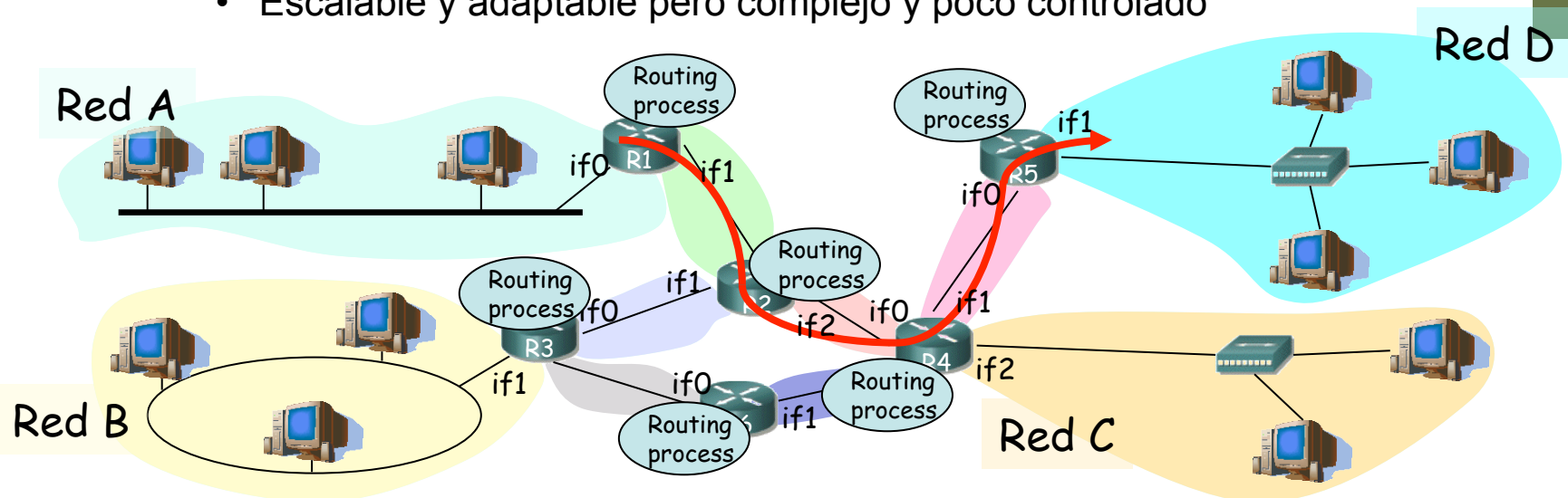
- Conocer los diferentes tipos básicos de protocolos/algoritmos de enrutamiento
- Conocer la estructura jerárquica de enrutamiento en la Internet

# Enrutamiento: Introducción

# Introducción

- IP ofrece un servicio de datagramas
- Encamina salto a salto
- La tabla de rutas se puede especificar:
  - Estática
    - Configuración manual
    - Cambios lentos
  - Dinámica
    - Proceso en cada router
    - Cálculo distribuido
    - Escalable y adaptable pero complejo y poco controlado

Router R1	
Destino	Next-hop
Red A	IP de if1 de R1
Red B	IP de if0 de R3
Red C	IP de if0 de R4
...	...

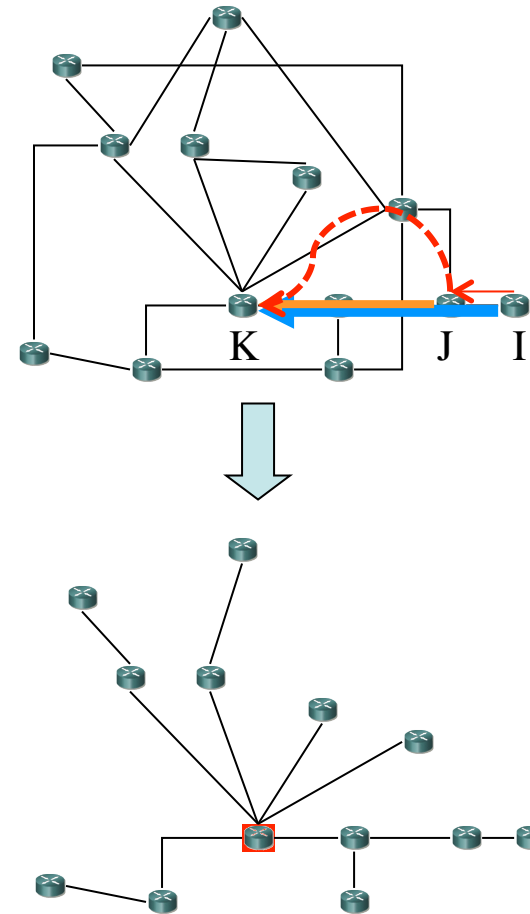


# Diferentes alternativas

- **Proactivo** vs reactivo
  - Según se calculen las rutas ante tráfico o previamente
- Centralizado vs. **distribuido**
  - Centralizado es más simple pero no escala
- *Source-routing* vs. **salto a salto**
  - Source-routing camino en la cabecera (*loose* o *hard*)
- **Único camino** vs. múltiples caminos
  - Mantener un camino o varios por cada red destino.
- **Adaptativo** vs. no adaptativo
  - Según reaccione a cambios en la red
- Tráfico **unicast** vs. Multicast
- Información global o descentralizada
  - Según el conocimiento de la red que tengan los routers

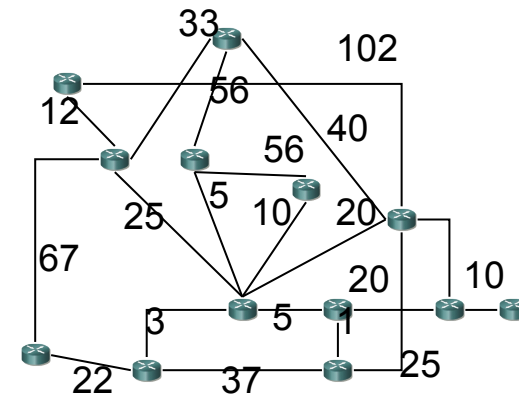
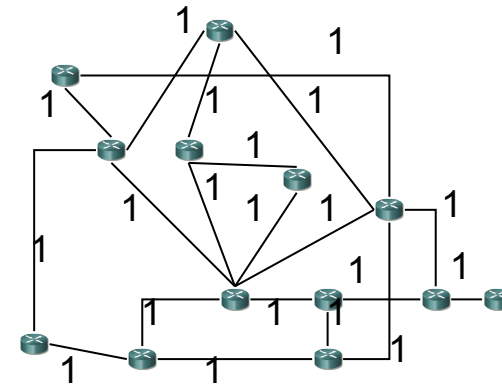
# Principio de optimalidad

- Si router *J* está en el camino óptimo desde *I* a *K* entonces el camino óptimo de *J* a *K* está en la misma ruta (...)
- Si existiera una ruta mejor de *J* a *K* se podría concatenar con la de *I* a *J* (...)
- El conjunto de rutas óptimas a un destino es un árbol = **sink tree** (...)
- Árbol  $\Rightarrow$  sin lazos (*loops*)



# ¿Camino óptimo?

- Ante una métrica aditiva: **Shortest paths** (*minimum spanning tree*)
- Métrica / pesos
  - Número de saltos (peso 1)
  - Distancia geográfica
  - Retardo de propagación
  - Longitud media de cola (retardo en cola)
  - Coste (€€)
- Métricas no aditivas
  - BW enlace
  - BW libre
  - Fiabilidad
- Combinación de métricas

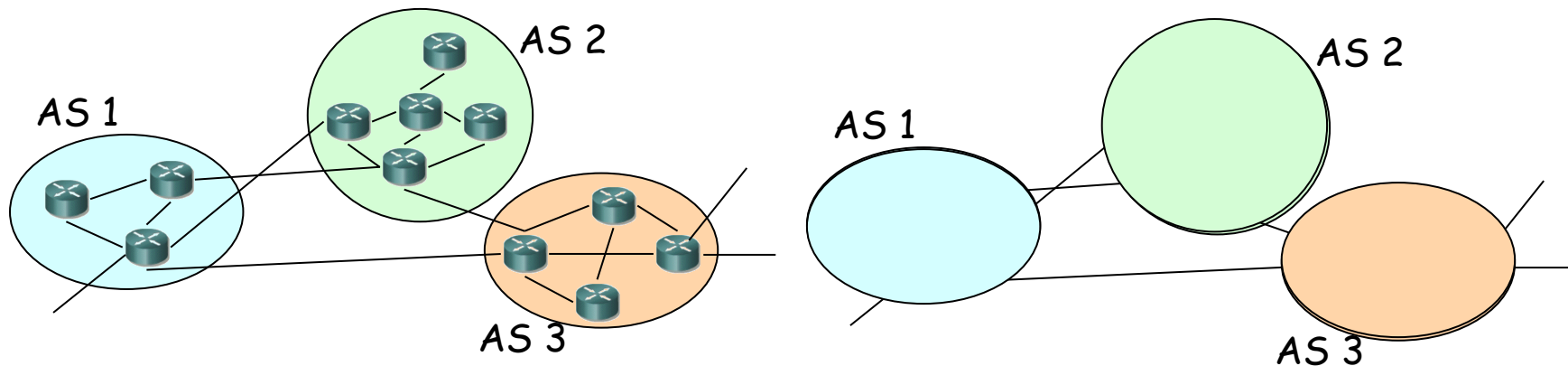




# Arquitectura de enrutamiento en Internet

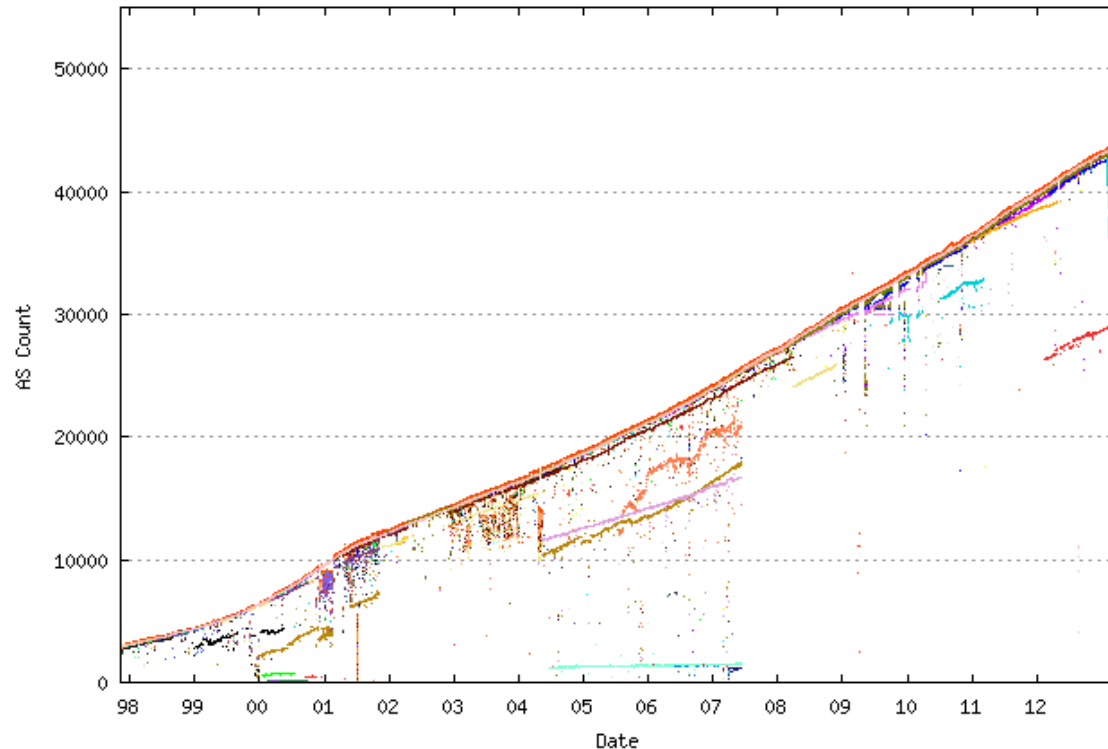
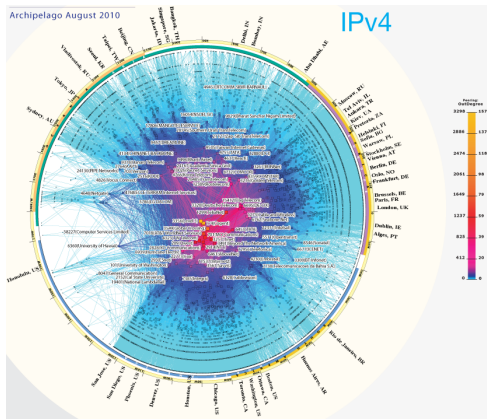
# Enrutamiento jerárquico

- ¿Un solo grafo para toda la Internet?
  - Problemas de escala
  - Problemas de coordinación (¿métrica?)
- Enrutamiento jerárquico
  - IGP: Interior Gateway Protocol
  - EGP: Exterior Gateway Protocol
  - Interior/exterior respecto a “sistemas autónomos” (*Autonomous Systems*)
  - “An AS is a connected group of one or more IP prefixes run by one or more network operators which has a SINGLE and CLEARLY DEFINED routing policy” (BCP 6)



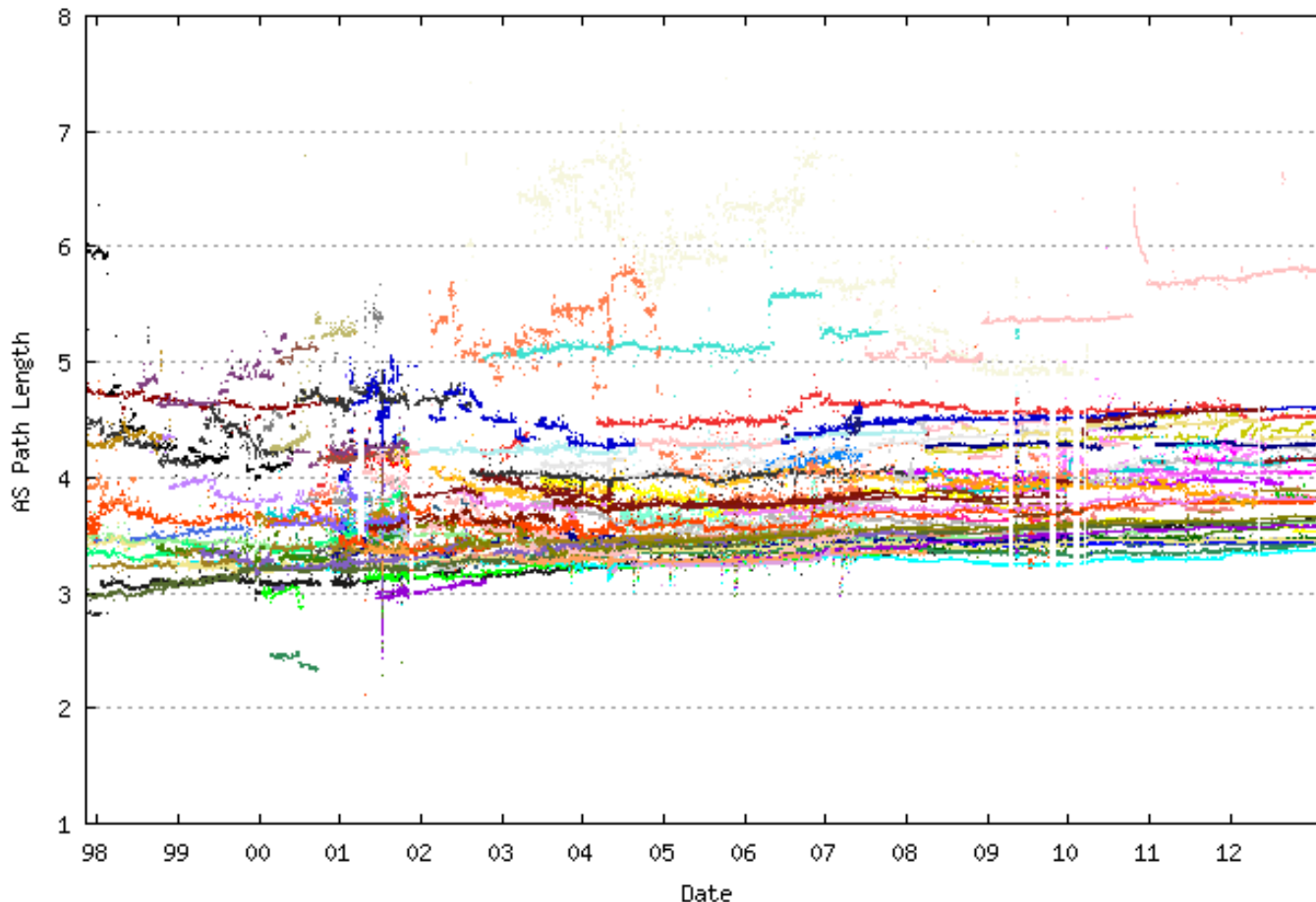
# Sistemas Autónomos

- Cada AS calcula rutas internas de forma independiente
- Otorga autonomía a cada AS para elegir y configurar su protocolo de enrutamiento interior
- ASN = Autonomous System Number (16 ó 32 bits)
- Más de 60K+ ASNs asignados (2013), 40K+ anunciados
- Un ISP puede tener asignado uno o más ASNs (hay muchos menos!)



# Longitud del camino exterior

- Ha crecido el número de ASs pero no las distancias entre ellos (en nº de ASs atravesados)
- Ha crecido el grado de conectividad



# ASNs: Ejemplos

```
$ whois -h whois.cymru.com 130.206.164.68
AS      | IP                | AS Name
766     | 130.206.164.68   | REDIRIS Entidad Publica Empresarial Red.es
```

```
$ whois -h whois.cymru.com 169.229.216.200
AS      | IP                | AS Name
25      | 169.229.216.200 | UCB - University of California at Berkeley
```

```
$ whois -h whois.cymru.com 72.21.194.212
AS      | IP                | AS Name
16509   | 72.21.194.212   | AMAZON-02 - Amazon.com, Inc.
```

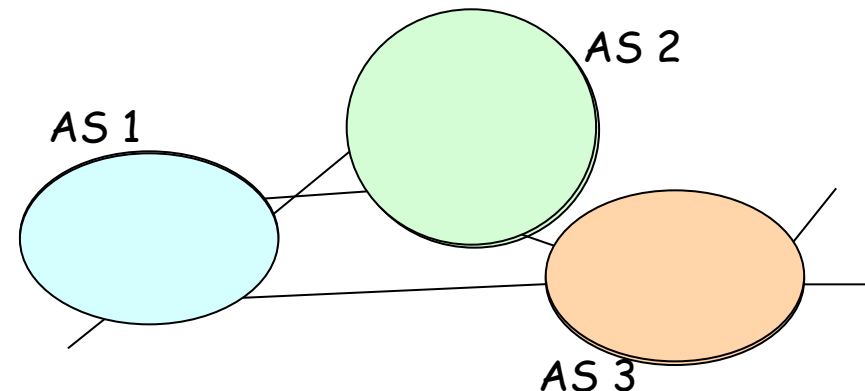
```
$ whois -h whois.cymru.com 8.8.8.8
AS      | IP                | AS Name
15169   | 8.8.8.8          | GOOGLE - Google Inc.
```

```
$ whois -h whois.cymru.com 81.47.192.13
AS      | IP                | AS Name
3352    | 81.47.192.13    | TELEFONICA-DATA-ESPANA TELEFONICA DE ESPANA
```

```
$ whois -h whois.cymru.com 187.8.1.1
AS      | IP                | AS Name
10429   | 187.8.1.1       | Telefonica Data S.A.
```

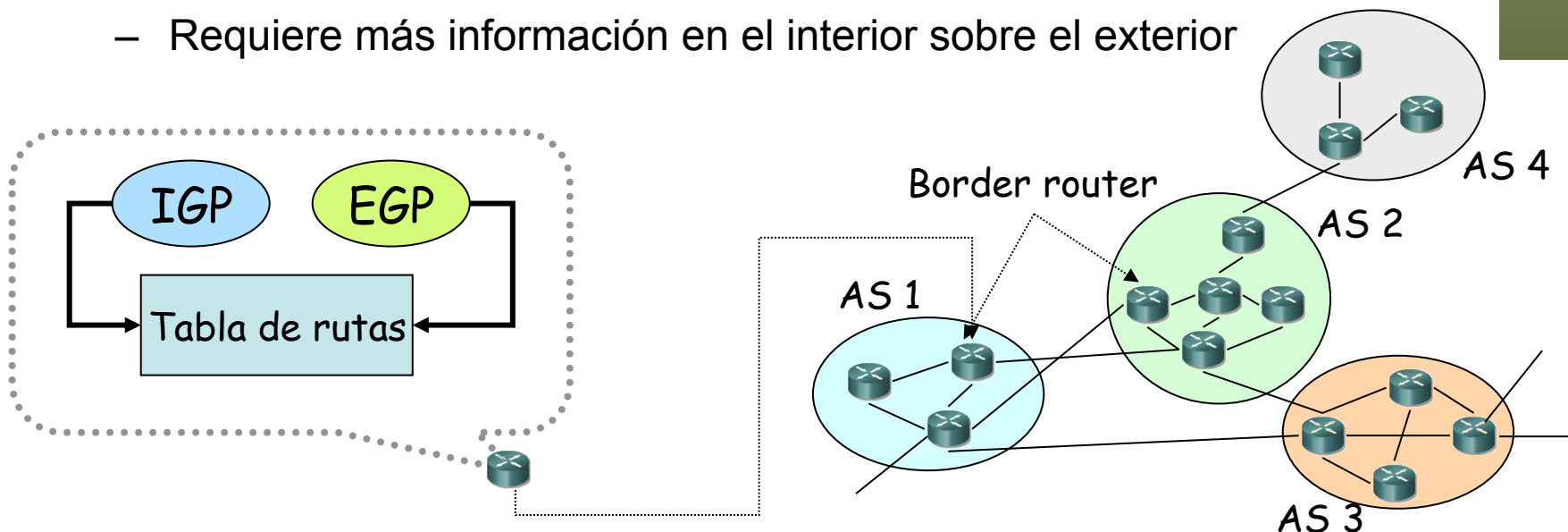
# Exterior Gateway Protocols (EGP)

- **Características:**
  - Mejor escalabilidad
  - Habilidad para agregar rutas
  - Habilidad para expresar políticas
  - Mayor carga en el router
- **BGP (Border Gateway Protocol):**
  - *Estándar de facto*
  - Algoritmo *path-vector* : anuncia el camino completo al destino (como una secuencia de ASs)
  - Los anuncios emplean conexiones TCP entre los routers



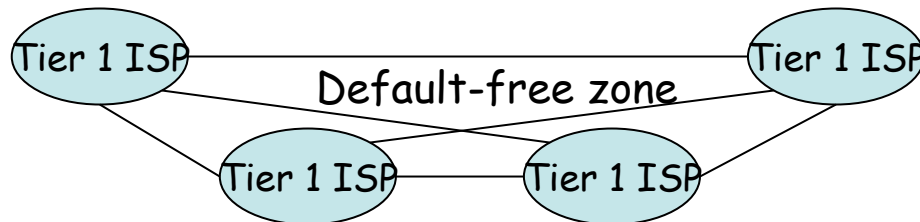
# Routers frontera

- En ellos la tabla de rutas es configurada por ambos protocolos
- IGP: rutas a destinos internos, EGP: rutas a destinos externos
- Si hay un solo enlace al exterior: routers internos solo necesitan una ruta por defecto hacia otros ASs
- Más de un enlace al exterior
  - Red multi-homed o de tránsito
  - Cada router interno necesita rutas para cada red externa para poder elegir la mejor salida del AS
  - O se puede mandar todo a la misma (la más cercana)
  - Requiere más información en el interior sobre el exterior



# Estructura de Internet

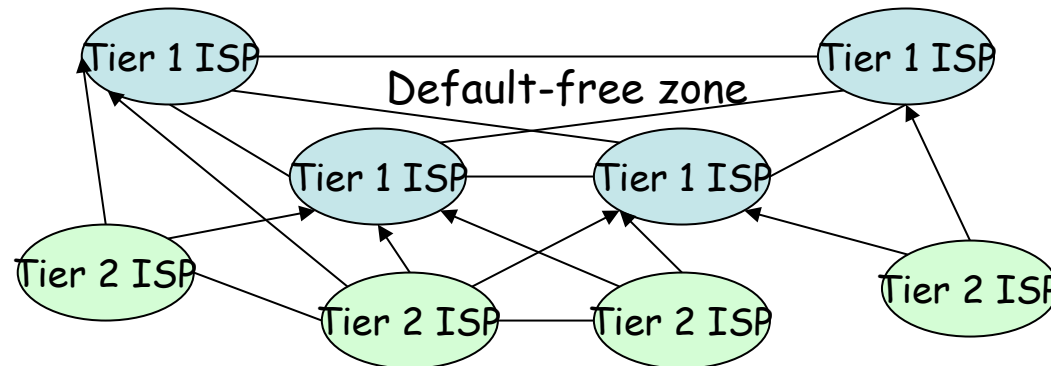
- **Tier-1 ISPs o Internet backbone networks**
  - Grandes proveedores internacionales (no claro cuáles, AT&T, NTT, Telefónica, Sprint, Verizon, etc., aproximadamente una docena)
  - Conexión completamente mallada (*peering agreements*)
  - No pagan a nadie por el tránsito
  - No emplean “ruta por defecto”, tienen rutas a todas las redes (2013: más de 400K rutas)





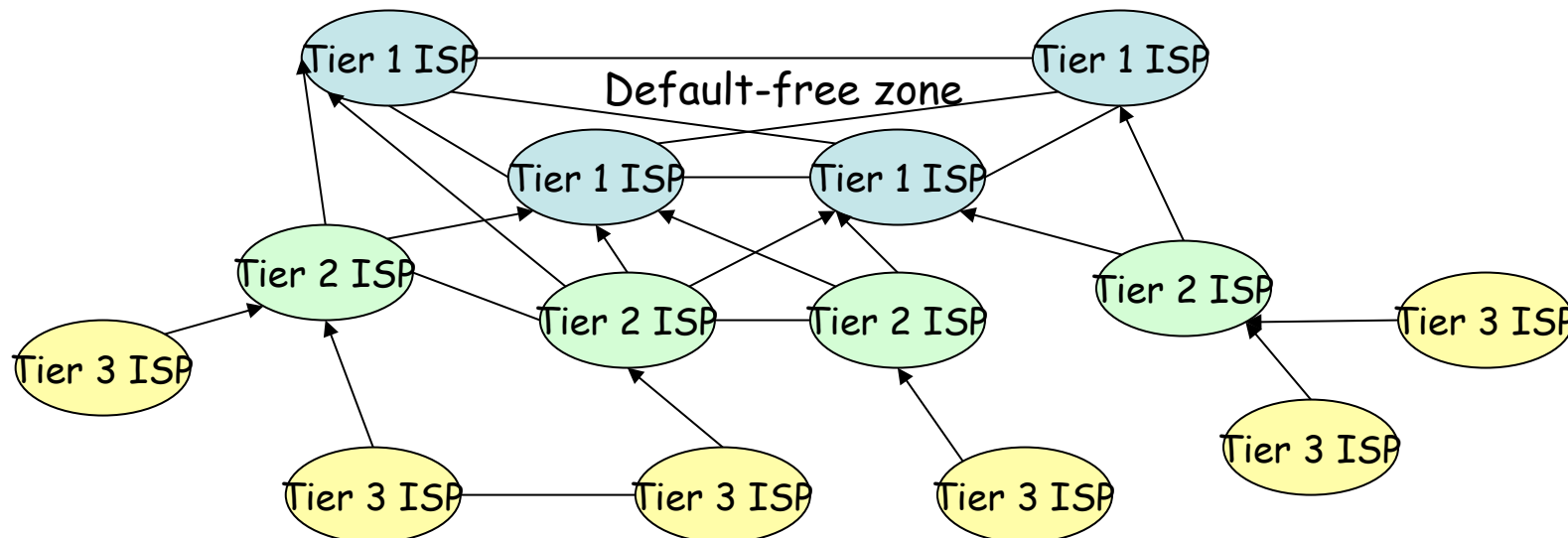
# Estructura de Internet

- **Tier-2 ISPs**
  - Regionales o nacionales
  - Contratan tránsito a unos pocos tier-1 ISPs (ellos son los clientes y el tier-1 el proveedor de tránsito)
  - Pueden establecer *peering agreements* con otros tier-2



# Estructura de Internet

- **Tier-3 ISPs**
  - ISPs locales de acceso
  - Contratan tránsito a uno o más tier-2 y pueden hacer *peering agreements* entre ellos

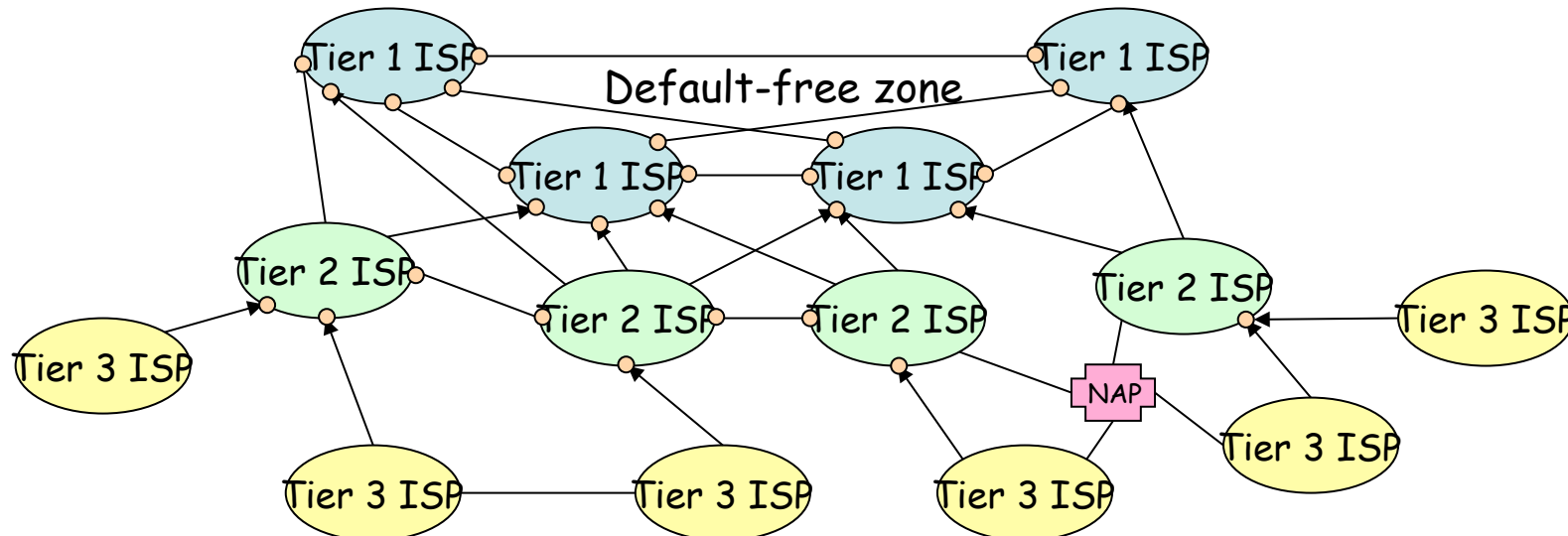
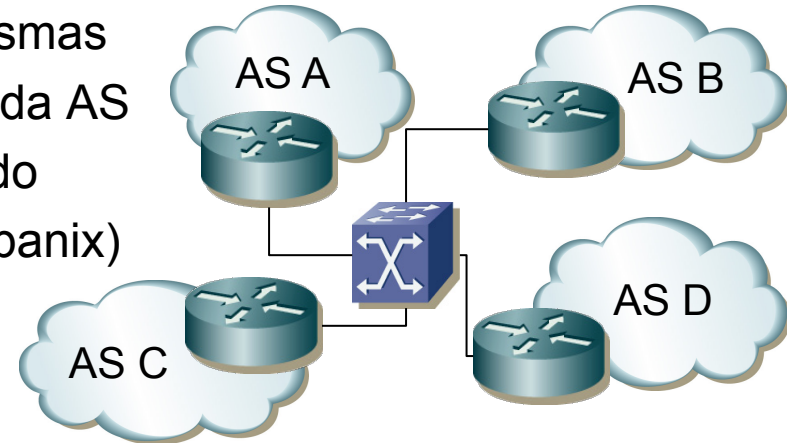


# Estructura de Internet

## Points of Presence (POPs)

### NAPs (Network Access Points) o IXP (Internet eXchange Point)

- Son redes de alta velocidad en sí mismas
- Por ejemplo switch L2 + router de cada AS
- Pretenden ahorrar €€ y reducir retardo
- Mantener local el tráfico local (ej: Espanix)

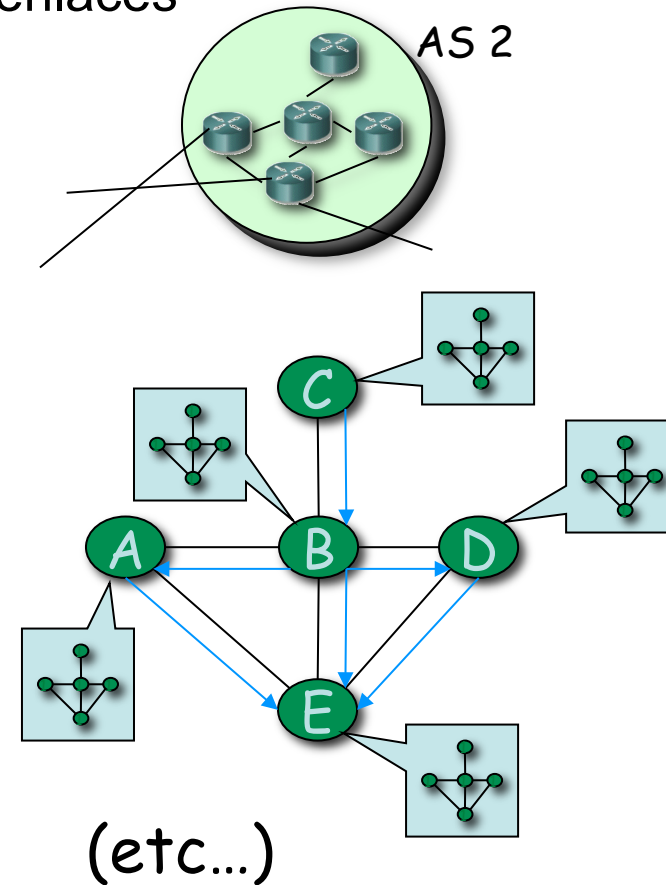


# Algoritmos de enrutamiento

# Link State

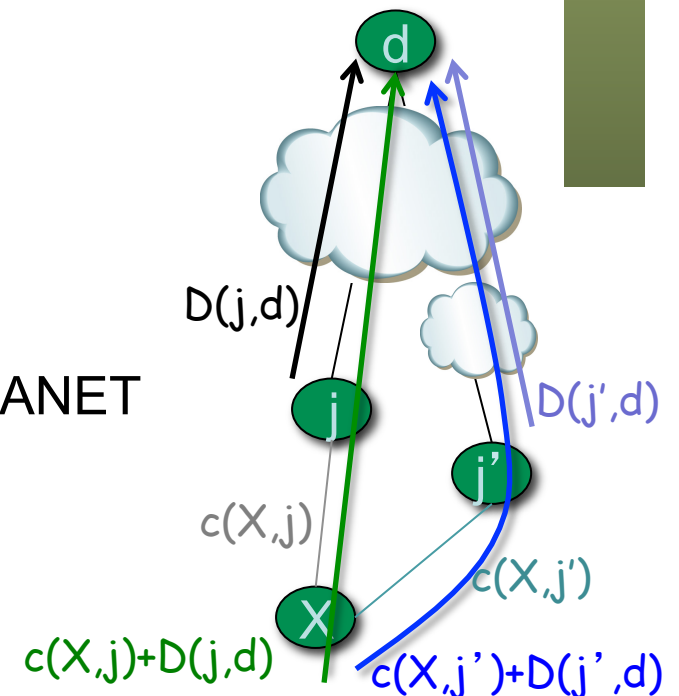
## Tres pasos

1. Descubrir a los vecinos
2. Diseminar la información sobre los enlaces
  - **Flooding** (... ..)
  - Todos conocen la topología (...)
3. Calcular las rutas
  - Caminos de menor coste
  - Todos calculan los mismos
  - Algoritmo de *Dijkstra*



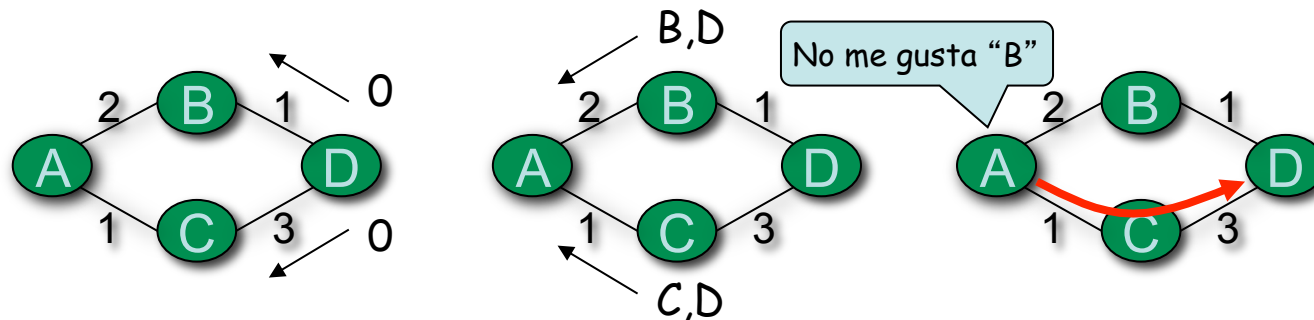
# Distance Vector

- Cada nodo X llega a conocer la distancia desde él a todos los destinos
  - $D(X,d_i)$
- Inicialmente cada nodo solo conoce distancia a sus vecinos (...)
  - $D(X,d) = c(X,d)$
- Periódicamente comunica  $D(X,d)$  a todos sus vecinos
  - Informan con un **vector** con las **distancias** a los destinos  
 (  $D(X,d_1), D(X,d_2), D(X,d_3), D(X,d_4), \dots$  )
  - Asíncrono
- Al recibir información actualiza (... ..):
  - $D(X,d) \leftarrow \min_{j/c(X,j) < \infty} \{c(X,j) + D(j,d)\}$
- Algoritmo de **Bellman-Ford** distribuido
- Empleado desde los comienzos de la ARPANET



# Path Vector

- Similar a Distance Vector
- Cálculo distribuido
- Informan a sus vecinos de las rutas calculadas
- Incluyen todo el camino hasta el destino para cada ruta
- Protocolos: BGP



# Algoritmos de Enrutamiento

## **Link State:**

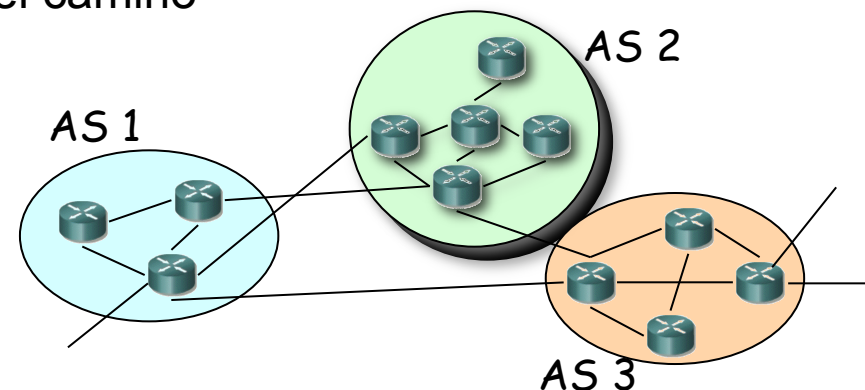
- Comunican qué vecinos tienen y el coste
- Inundan la red
- Cada nodo conoce la topología entera
- Protocolos: OSPF, IS-IS, PNNI...

## **Distance Vector:**

- Comunican estimación de distancia a destinos
- Informan a vecinos
- Protocolos: RIP, IGRP, DECnet RP, DSDV, IPX-RIP...

## **Path Vector:**

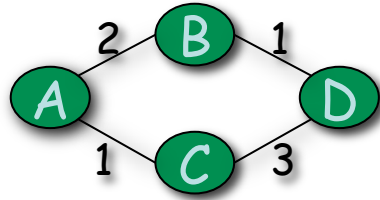
- Comunican estimación de caminos preferidos a destinos
- Se evitan bucles evitando repetir en el camino
- Protocolos: BGP





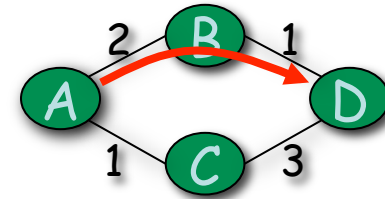
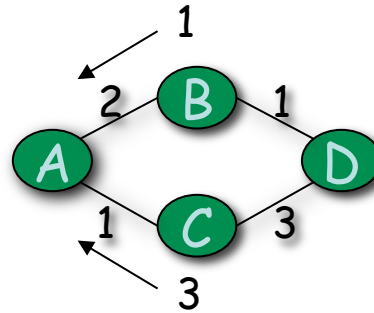
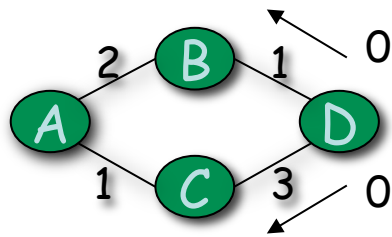
# Algoritmos de Enrutamiento

Link State

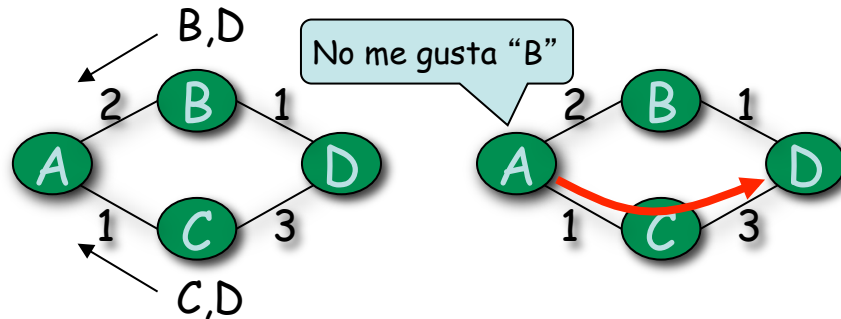
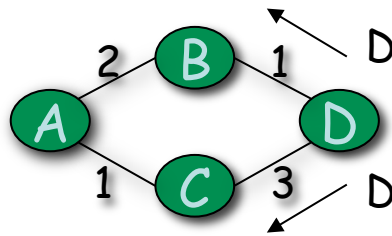


A: [B, 2], [C, 1]  
 B: [A, 2], [D, 1]  
 C: [A, 1], [D, 3]  
 D: [B, 1], [C, 3]

Distance Vector



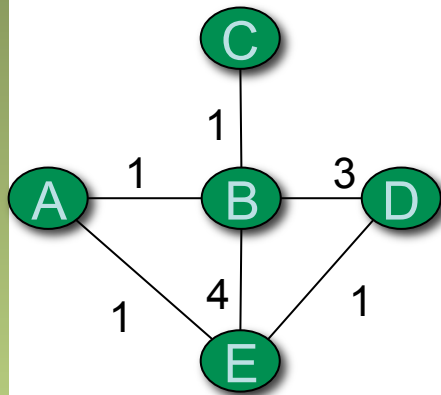
Path Vector



# Bellman-Ford: Ejemplo

# Algoritmo de Bellman-Ford

- Comienzo



Dest	Next	Cost
B	B	1
C	-	$\infty$
D	-	$\infty$
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
C	C	1
D	D	3
E	E	4

Dest	Next	Cost
A	-	$\infty$
B	B	1
D	-	$\infty$
E	-	$\infty$

Dest	Next	Cost
A	-	$\infty$
B	B	3
C	-	$\infty$
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
B	B	4
C	-	$\infty$
D	D	1

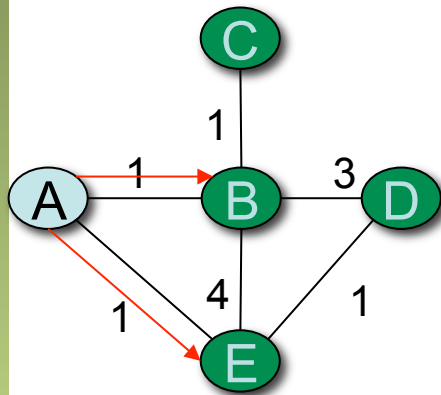
# Algoritmo de Bellman-Ford

A envía

$$D(E,d) \leftarrow \min\{c(E,A)+D(A,d)\}$$

$$D(B,d) \leftarrow \min\{c(B,A)+D(A,d)\}$$

(...)



Dest	Next	Cost
B	B	1
C	-	$\infty$
D	-	$\infty$
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
C	C	1
D	D	3
E	E	4

Dest	Next	Cost
A	-	$\infty$
B	B	1
D	-	$\infty$
E	-	$\infty$

Dest	Next	Cost
A	-	$\infty$
B	B	3
C	-	$\infty$
E	E	1

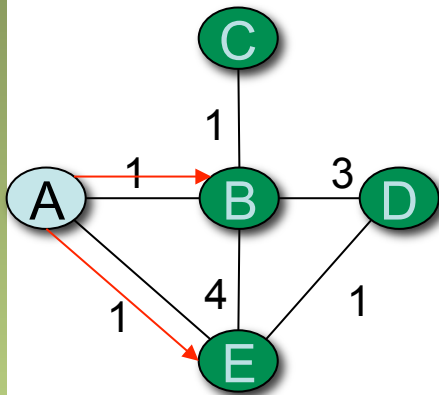
Dest	Next	Cost
A	A	1
B	B	4
C	-	$\infty$
D	D	1

# Algoritmo de Bellman-Ford

A envía

$$D(E,d) \leftarrow \min\{c(E,A)+D(A,d)\}$$

$$D(B,d) \leftarrow \min\{c(B,A)+D(A,d)\}$$



Dest	Next	Cost
B	B	1
C	-	$\infty$
D	-	$\infty$
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
C	C	1
D	D	3
E	A (E)	2 (4)

Dest	Next	Cost
A	-	$\infty$
B	B	1
D	-	$\infty$
E	-	$\infty$

Dest	Next	Cost
A	-	$\infty$
B	B	3
C	-	$\infty$
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
B	A (B)	2 (4)
C	-	$\infty$
D	D	1

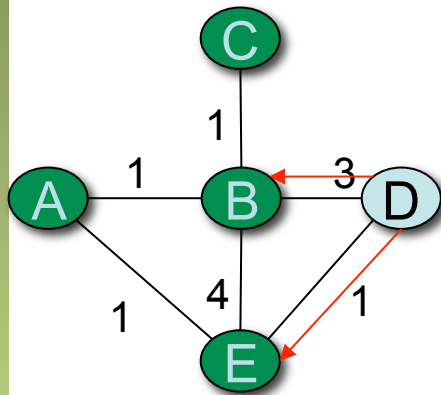
# Algoritmo de Bellman-Ford

D envía

$$D(E,d) \leftarrow \min\{c(E,D)+D(D,d)\}$$

$$D(B,d) \leftarrow \min\{c(B,D)+D(D,d)\}$$

No hay cambios



Dest	Next	Cost
B	B	1
C	-	$\infty$
D	-	$\infty$
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
C	C	1
D	D	3
E	A	2

Dest	Next	Cost
A	-	$\infty$
B	B	1
D	-	$\infty$
E	-	$\infty$

Dest	Next	Cost
A	-	$\infty$
B	B	3
C	-	$\infty$
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
B	A	2
C	-	$\infty$
D	D	1

# Algoritmo de Bellman-Ford

B envía

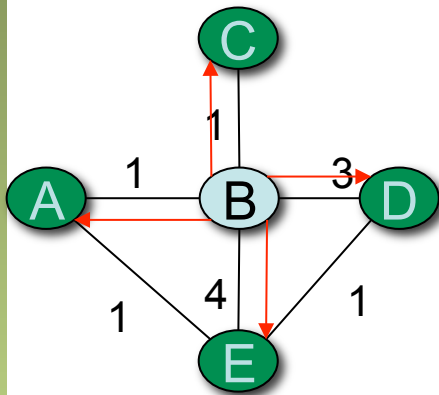
$$D(A,d) \leftarrow \min\{c(A,B)+D(B,d)\}$$

$$D(C,d) \leftarrow \min\{c(C,B)+D(B,d)\}$$

$$D(D,d) \leftarrow \min\{c(D,B)+D(B,d)\}$$

$$D(E,d) \leftarrow \min\{c(E,B)+D(B,d)\}$$

(...)



Dest	Next	Cost
B	B	1
C	-	$\infty$
D	-	$\infty$
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
C	C	1
D	D	3
E	A	2

Dest	Next	Cost
A	-	$\infty$
B	B	1
D	-	$\infty$
E	-	$\infty$

Dest	Next	Cost
A	-	$\infty$
B	B	3
C	-	$\infty$
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
B	A	2
C	-	$\infty$
D	D	1

# Algoritmo de Bellman-Ford

B envía

$$D(A,d) \leftarrow \min\{c(A,B)+D(B,d)\}$$

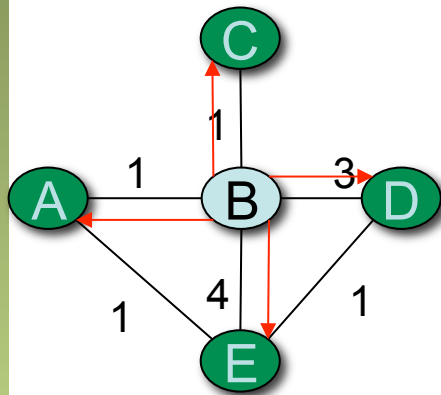
$$D(C,d) \leftarrow \min\{c(C,B)+D(B,d)\}$$

$$D(D,d) \leftarrow \min\{c(D,B)+D(B,d)\}$$

$$D(E,d) \leftarrow \min\{c(E,B)+D(B,d)\}$$

Dest	Next	Cost
B	B	1
C	B (-)	2 ( $\infty$ )
D	B (-)	4 ( $\infty$ )
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
C	C	1
D	D	3
E	A	2



Dest	Next	Cost
A	B (-)	2 ( $\infty$ )
B	B	1
D	B (-)	4 ( $\infty$ )
E	B (-)	3 ( $\infty$ )

Dest	Next	Cost
A	B (-)	4 ( $\infty$ )
B	B	3
C	B (-)	4 ( $\infty$ )
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
B	A	2
C	B (-)	5 ( $\infty$ )
D	D	1

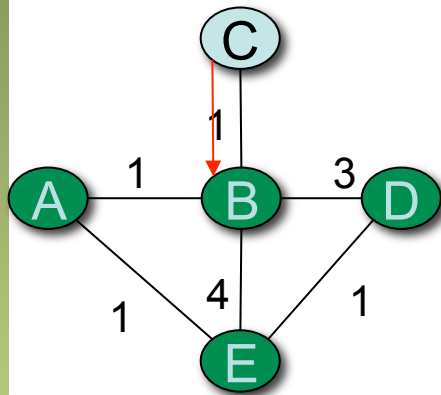


# Algoritmo de Bellman-Ford

C envía

$$D(B,d) \leftarrow \min\{c(B,C)+D(C,d)\}$$

No hay cambios



Dest	Next	Cost
B	B	1
C	B	2
D	B	4
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
C	C	1
D	D	3
E	A	2

Dest	Next	Cost
A	B	2
B	B	1
D	B	4
E	B	3

Dest	Next	Cost
A	B	4
B	B	3
C	B	4
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
B	A	2
C	B	5
D	D	1

# Algoritmo de Bellman-Ford

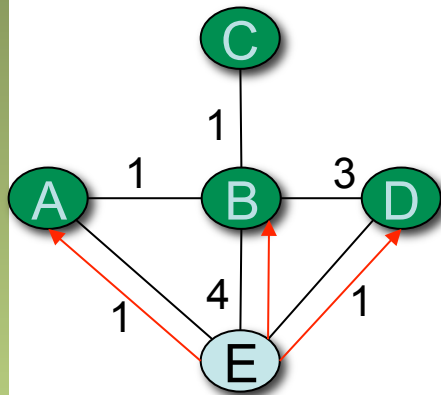
E envía

$$D(A,d) \leftarrow \min\{c(A,E)+D(E,d)\}$$

$$D(B,d) \leftarrow \min\{c(B,E)+D(E,d)\}$$

$$D(D,d) \leftarrow \min\{c(D,E)+D(E,d)\}$$

(...)



Dest	Next	Cost
B	B	1
C	B	2
D	B	4
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
C	C	1
D	D	3
E	A	2

Dest	Next	Cost
A	B	2
B	B	1
D	B	4
E	B	3

Dest	Next	Cost
A	B	4
B	B	3
C	B	4
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
B	A	2
C	B	5
D	D	1

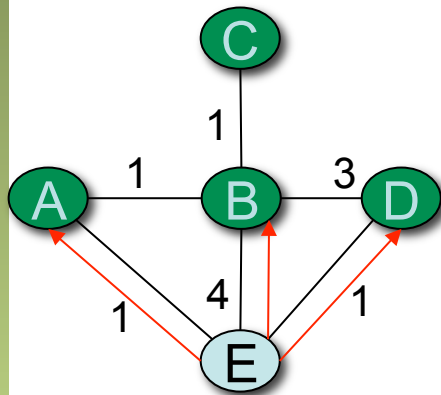
# Algoritmo de Bellman-Ford

E envía

$$D(A,d) \leftarrow \min\{c(A,E)+D(E,d)\}$$

$$D(B,d) \leftarrow \min\{c(B,E)+D(E,d)\}$$

$$D(D,d) \leftarrow \min\{c(D,E)+D(E,d)\}$$



Dest	Next	Cost
B	B	1
C	B	2
D	E (B)	2 (4)
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
C	C	1
D	D	3
E	A	2

Dest	Next	Cost
A	B	2
B	B	1
D	B	4
E	B	3

Dest	Next	Cost
A	E (B)	2 (4)
B	B	3
C	B	4
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
B	A	2
C	B	5
D	D	1

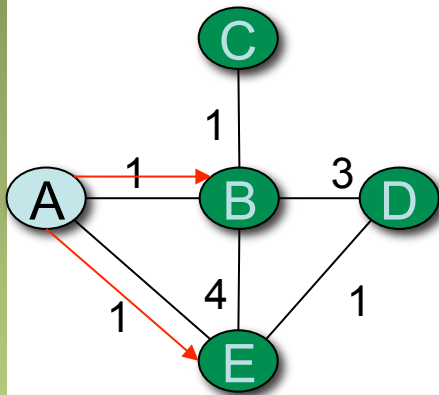
# Algoritmo de Bellman-Ford

A envía

$$D(E,d) \leftarrow \min\{c(E,A)+D(A,d)\}$$

$$D(B,d) \leftarrow \min\{c(B,A)+D(A,d)\}$$

(...)



Dest	Next	Cost
B	B	1
C	B	2
D	E	2
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
C	C	1
D	D	3
E	A	2

Dest	Next	Cost
A	B	2
B	B	1
D	B	4
E	B	3

Dest	Next	Cost
A	E	2
B	B	3
C	B	4
E	E	1

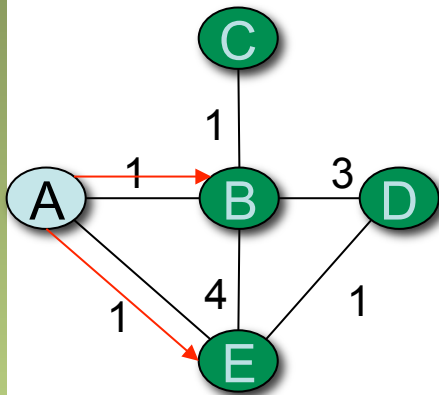
Dest	Next	Cost
A	A	1
B	A	2
C	B	5
D	D	1

# Algoritmo de Bellman-Ford

A envía

$$D(E,d) \leftarrow \min\{c(E,A)+D(A,d)\}$$

$$D(B,d) \leftarrow \min\{c(B,A)+D(A,d)\}$$



Dest	Next	Cost
B	B	1
C	B	2
D	E	2
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
C	C	1
D	D	3
E	A	2

Dest	Next	Cost
A	B	2
B	B	1
D	B	4
E	B	3

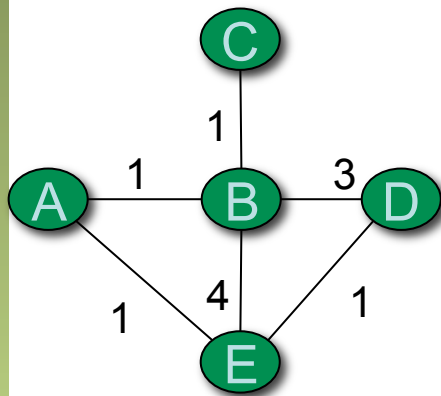
Dest	Next	Cost
A	E	2
B	B	3
C	B	4
E	E	1

Dest	Next	Cost
A	A	1
B	A	2
C	A (B)	3 (5)
D	D	1

# Algoritmo de Bellman-Ford

- D envía  
No hay cambios
- B envía  
No hay cambios
- C envía  
No hay cambios
- E envía  
No hay cambios
- A envía  
No hay cambios

Dest	Next	Cost	Dest	Next	Cost
B	B	1	A	A	1
C	B	2	C	C	1
D	E	2	D	D	3
E	E	1	E	A	2



Dest	Next	Cost	Dest	Next	Cost	Dest	Next	Cost
A	B	2	A	E	2	A	A	1
B	B	1	B	B	3	B	A	2
D	B	4	C	B	4	C	A	3
E	B	3	E	E	1	D	D	1

# Resumen

- La estructura de Internet es jerárquica
- Esto lleva a un enrutamiento jerárquico dividido en:
  - Intradomain
  - Interdomain
  - Diferente problemática para ambos
- Algoritmos empleados por los protocolos
  - Distance-vector
  - Link-State
  - Path-vector